

능동형 SAR 시스템의 송수신 모듈 출력 보정 방법 연구

A Study of T/R Module Output Compensation Method for Active Synthetic Aperture Radar

이동우 · 이종환 · 김세영 · 전병태

Dong-Woo Yi · Jong-Hwan Lee · Se-Young Kim · Byoung-Tae Jeon

요 약

본 논문에서는 기 개발된 능동형 SAR(Synthetic Aperture Radar) 안테나의 송수신 모듈 출력에서 발생하는 이득과 위상 오차를 보정하는 방법에 대해 소개한다. 먼저 오차에 대해 정의하고, 시범 측정을 통해 획득한 측정값을 바탕으로 오차의 특성을 분석한 뒤, 이를 보상하기 위한 송수신 모듈의 제어 방법을 제안하였다. 16조의 송수신 모듈로 구성된 안테나에서 보정 전 이득은 28.2~29.0 dBm, 위상은 101.7°~165.2°의 분포를 보였으나, 보정 후 이득은 27.4~28.0 dBm, 위상은 116.1°~120.0°의 분포를 나타내었다. 이러한 송수신 모듈의 출력 분포를 바탕으로 배열 이론을 적용하여 안테나 빔 패턴을 생성하고 비교함으로써 제안한 보정 방법이 능동형 SAR 시스템의 성능 만족에 효과적임을 검증하였다.

Abstract

In this paper, a compensation method of the amplitude and phase errors from the T/R(Transmit/Receive) modules in an active SAR(Synthetic Aperture Radar) system is introduced. The errors are defined and classified, and characterized by analyzing the measurement data acquired from the pilot test. To compensate these errors, a control methodology of T/R modules output is proposed. Before the compensation is applied, 16 T/R modules integrated on the active SAR antenna show the amplitude in 28.2~29.0 dBm and the phase in 101.7°~165.2°. After the compensation, the amplitude and phase are distributed in 27.4~28.0 dBm and 116.1°~120.0° respectively. The antenna beam patterns generated by the array theory with the distributions are compared, and the proposed method is verified as good to apply for the active SAR system.

Key words : Active Phased Array, T/R Module, Compensation, SAR

I. 서 론

SAR(Synthetic Aperture Radar)는 전파를 송신하고 지표면에서 반사된 신호를 처리하여 영상을 획득하는 장비이다. 특히 능동 위상 배열 안테나를 이용한 능동형 SAR 시스템은 신속한 빔 조향 및 빔 형성이 가능해 SAR의 다양한 운용 모드 및 응용에 대한 요구를 충족시킬 수 있다^[1].

그림 1은 일반적인 능동 위상 배열 안테나의 빔 패턴 형성 개념도이다. 능동 위상 배열 안테나의 빔 패턴은 그림 1과 같이 안테나 면에서의 이득과 위상 분포의 공간 합성에 의해 유도되며, 안테나 면 분포는 송수신 모듈 내의 디지털 감쇠기와 위상 변위기 제어에 의해 결정된다^[2]. SAR 시스템에서 안테나 빔 패턴은 주요 성능 변수의 하나로 원하는 빔 패턴 획득은 관찰 지역에 대한 정확한 정보 확보 및 모호성

국방과학연구소(Agency for Defense Development)

· 논문 번호 : 20100420-046

· 교신저자 : 이동우(e-mail : fullace111@paran.com)

· 수정완료일자 : 2010년 8월 17일

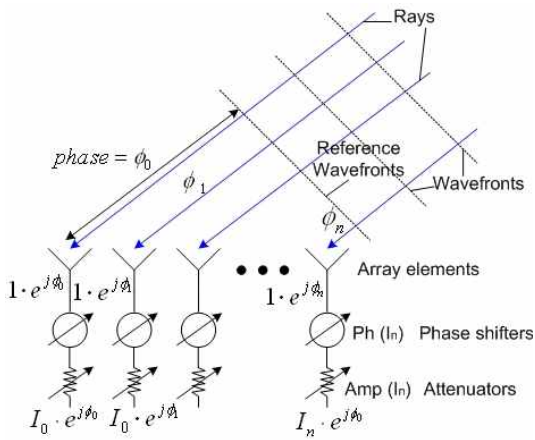


그림 1. 능동 위상 배열 안테나 개념도
Fig. 1. Active phased array antenna scheme.

비(ambiguity to signal ratio)와 같은 시스템 규격 만족을 위해 반드시 필요하다³⁾.

그러나 능동 위상 배열 안테나의 송수신 모듈은 자체 특성과 환경적인 요인으로 인해 다양한 오차를 포함한다. 이러한 오차는 왜곡된 빔 패턴을 야기해 SAR 성능을 저하시킨다. 2005년 발사한 독일의 Terra-SAR X는 능동형 SAR 안테나를 탑재한 대표적인 위성이다. Terra-SAR X는 안테나 빔 패턴 성능 만족을 위해 송수신 모듈에 대해 다음과 같은 요구 조건을 설정하였다⁴⁾.

- T/R module amplitude setting error: 0.5 dB
- T/R module amplitude stability(Temp.): 0.5 dB
- T/R module phase setting error: 5° rms
- T/R module phase stability(Temp.): 6°

이러한 요구 조건 만족을 위해 많은 시간과 노력을 기울여 온도 별, 설정값 별로 개별 송수신 모듈을 측정하였다⁵⁾. 그러나 개별 송수신 모듈에 대해서 온도 별, 설정값 별로 모든 상태 변화에 대해서 측정하는 것은 많은 시간과 노력이 필요하다.

본 논문의 본론 1절에서는 기 개발된 안테나 시스템의 구성 및 각 구성품의 기능에 대해서 개략적으로 소개하고, 2절은 기 개발된 안테나 시스템에서 발생한 송수신 모듈의 이득과 위상 오차를 분류하고 정의한다. 3절은 개별 송수신 모듈 측정 결과 및 시범 측정을 통해 획득한 데이터를 분석하여 보정에 필요한 데이터의 효율적인 확보 및 송수신 모듈의

오차 특성에 대해서 서술하고, 4절은 분석된 오차 특성을 이용한 보정 방법 및 송수신 모듈의 제어 방법에 대해서 서술한다. 5절은 보정 전과 후의 송수신 모듈 출력을 측정하여 비교하고, 획득한 송수신 모듈 출력 결과에 배열 이론을 적용하여 안테나 빔 패턴을 생성 및 비교함으로써 제안한 보정 방법에 대한 효율성을 확인한다. 마지막으로 III장에서 결론을 내리도록 한다.

II. 본 론

2.1 안테나부의 구성과 구성품의 기능

그림 2와 3은 개발된 안테나부의 전면과 후면 사진이다. 전면에는 이중 편파가 가능한 적층형 슬롯 결합 마이크로스트립 패치 배열 안테나가 위치하며, 개발된 배열 안테나는 8×12 배열 복사 소자 보드 2식으로 구성된다⁶⁾. 안테나부 후면의 덮개를 탈거하면 케이스 안에 BCU(Beam Control Unit)와 PSU(Power Supply Unit), 16조의 송수신 모듈이 조립되어 있는 EFE(Electronic Front End), 그리고 하니스가 배치되어 있다. 그림 4는 안테나의 기능 블록도이다. BCU는 송수신 모듈의 이득과 위상 제어를 위한 빔 파라미터 전달 및 각 구성품의 온도 정보를 수집하며, PSU는 EFE 및 송수신 모듈에 전원을 공급한다. EFE는 송수신 모듈의 제어 및 전원 공급, 그리고 RF 신호

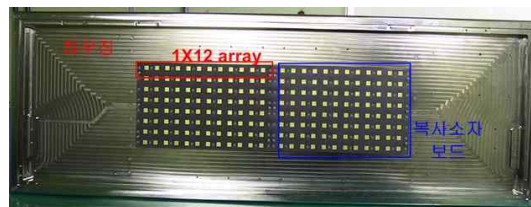


그림 2. 개발된 안테나부(전면)
Fig. 2. Developed antenna subsystem(front).

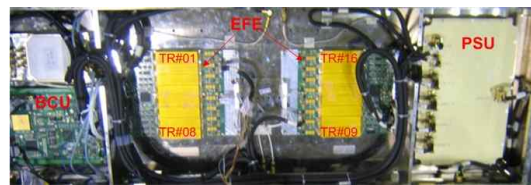


그림 3. 개발된 안테나부(후면)
Fig. 3. Developed antenna subsystem(back).

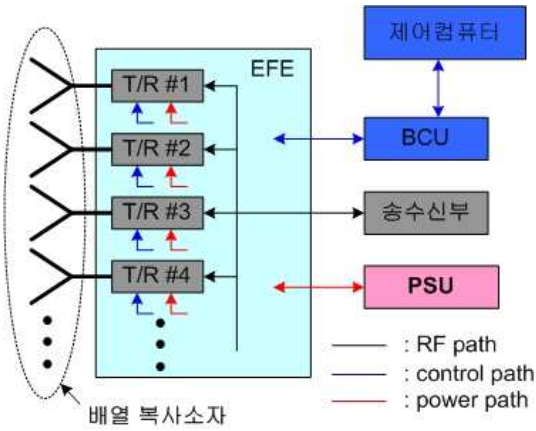


그림 4. 안테나 기능 블록도
Fig. 4. Functional block diagram of the antenna.

호의 결합과 분배 역할을 한다. 송수신 모듈은 6 비트의 디지털 감쇠기와 위상 변위기를 이용해 이득과 위상을 제어한다. 하나의 송수신 모듈은 1×12 배열 소자와 연결되며, 고각 방향으로 8조의 송수신 모듈이, 방위각 방향으로 2조의 송수신 모듈이 배열되어 하나의 EFE에는 8×1의 송수신 모듈 배열을 가진다^[7].

2-2 송수신 모듈의 오차 정의

개발된 송수신 모듈에서 발생할 수 있는 오차에 대한 정의는 다음과 같다.

2-2-1 송수신 모듈 오프셋 오차

같은 공정을 거쳐 제작된 송수신 모듈도 완벽하게 동일하게 구현할 수 없다. 이로 인해 디지털 감쇠기와 위상 변위기를 같은 값으로 제어를 해도 송수신 모듈 간 출력 신호에서 차이가 발생한다. 기본적으로 디지털 감쇠기와 위상 변위기가 정상 동작한다면 상대적인 비트 제어에 의한 출력 변화는 일정하다. 따라서 이러한 송수신 모듈 간 오프셋 오차는 디지털 감쇠기를 0 dB로 제어하고 위상 변위기를 0°로 설정한 경우, 송수신 모듈 간의 출력 신호의 차이로 정의할 수 있다. 그림 5와 6은 수신 경로에 대한 16조의 송수신 모듈의 이득과 위상 오프셋 오차의 측정 결과를 보여 준다. 이득의 경우, 16조의 송수신 모듈 간 peak to peak 0.8 dBm의 차이가 있으며, 위상은 peak to peak 약 34°의 차이가 있다.

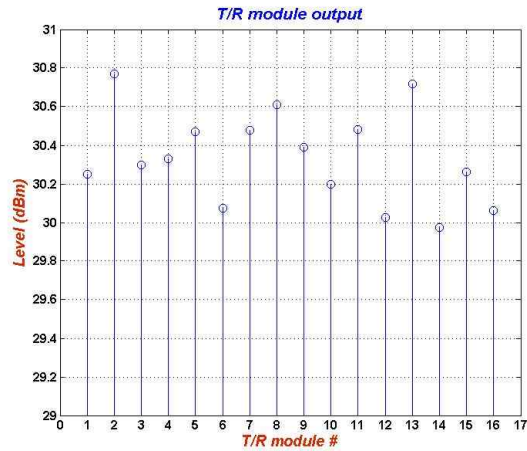


그림 5. 송수신 모듈 출력 오프셋 오차(이득)
Fig. 5. Offset error among T/R modules(amplitude).

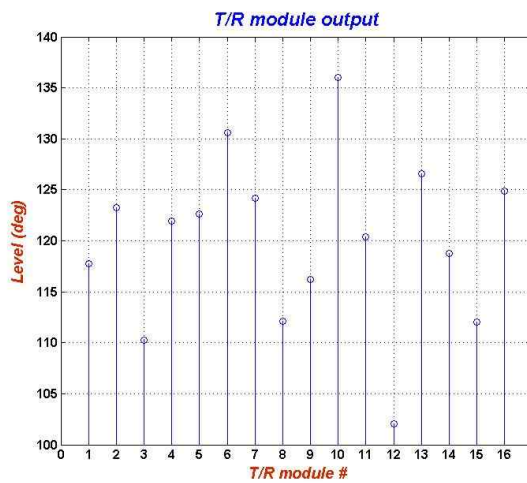


그림 6. 송수신 모듈 출력 오프셋 오차(위상)
Fig. 6. Offset error among T/R modules(phase).

2-2-2 송수신 모듈 설정 오차

각 송수신 모듈은 6 비트의 디지털 감쇠기와 위상 변위기 제어가 가능하므로 이득과 위상에 대해 각각 64개의 상태가 있으며, 비트 변화 당 0.5 dB와 5.625°씩 상태를 변화시킬 수 있다. 그러나 송수신 모듈의 이득 또는 위상의 상태 변화 시 정확하게 0.5 dB씩 또는 5.625°씩 변화하지 않는다. 또한, 위상 변위기 값을 고정하고 디지털 감쇠기의 상태를 변화시키면 디지털 감쇠기의 경로 차로 인해 위상 출력이 변하며, 반대의 경우도 그러한 오차가 발생한다. 이러한 개별 송수신 모듈의 설정 값과의 오차를 송수신 모

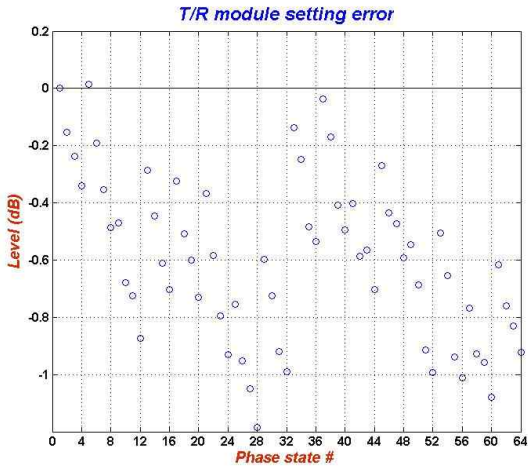


그림 7. 송수신 모듈 설정 오차(이득)
Fig. 7. T/R module setting error(amplitude).

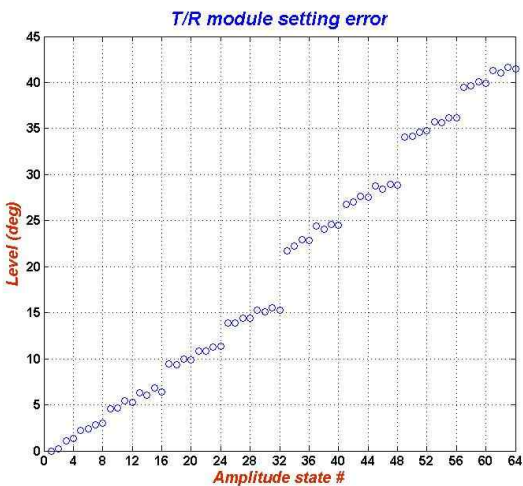


그림 8. 송수신 모듈 설정 오차(위상)
Fig. 8. T/R module setting error(phase).

들 설정 오차로 정의하였다.

그림 7과 8은 송수신 모듈의 설정 오차의 일부를 보여 준다. 그림 7은 16조의 송수신 모듈 중 하나의 송수신 모듈의 결과를 예시로 보이는 것이며, 이득은 0 dB로 고정하고 위상에 대해서 64 상태 변화한 경우 이득의 변화 결과이다. 그림 8은 위상을 0°로 고정하고 이득에 대해서 64 상태 변화한 후 위상의 변화 결과를 나타낸다. 본 결과는 상대적인 변화를 정확하게 보기 위해 이득과 위상을 0 dB와 0°로 설정한 결과로 정규화한 값이다. 결과에서 확인할 수 있듯이 이득 값을 고정해도 위상의 상태 변화에 의

해 이득 값이 변하며, 반대의 경우도 위상 변화가 있다. 이득에서는 약 1.2 dB의 차이가 있으며, 위상에서는 약 40°의 차이를 확인하였다.

2-2-3 송수신 모듈 온도 변화 오차

보통 SAR 시스템은 지상에서의 고정 운용이 아니라 플랫폼에 실려 운용되며, 특히 안테나는 전파 방사를 위해 외부 환경에 노출되어 있다. 따라서 플랫폼 고도 변화나 계절의 영향으로 인해 온도 변화가 크다. 이러한 온도 변화에 의한 송수신 모듈의 이

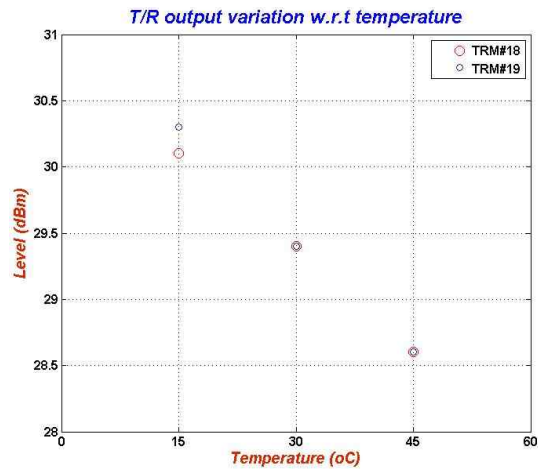


그림 9. 송수신 모듈 온도 변화 오차(이득)
Fig. 9. T/R module error due to temperature variation (amplitude).

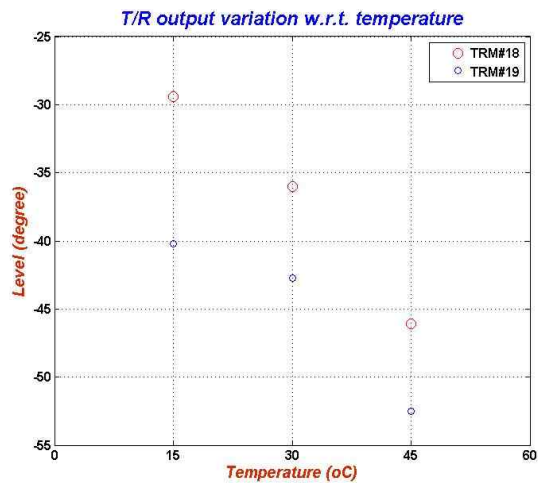


그림 10. 송수신 모듈 온도 변화 오차(위상)
Fig. 10. T/R module error due to temperature variation (phase).

득과 위상 오차를 송수신 모듈 온도 변화 오차로 정의하였다. 그림 9와 10은 중심 주파수에서 온도 변화로 인한 2조의 송수신 모듈의 이득과 위상 변화에 대한 예시이다. 이득의 경우, 송수신 모듈 별로 차이가 있지만 온도 30 °C 변하는 동안 약 1.5 dB의 변화가 있었으며, 위상의 경우 약 15° 정도의 변화가 있었다. 다음 절에서 위에서 정의한 오차의 특성을 분석하도록 한다.

2.3 오차 특성 분석

위에서 언급한 오차들을 보정하기 위해서는 16조의 송수신 모듈을 개별적으로 온도를 변화시키면서 이득과 위상 상태를 변화시켜 온도 별 64×64 상태에 대한 출력 데이터가 필요하다. 또한, 송수신 모듈의 송수신 경로가 다르고, 기 개발된 능동형 SAR 시스템은 이중 편파를 지원하므로, 두 가지 편파에 대해서 각각 수행해야 하므로 다양한 경우의 수와 열 교환기를 이용한 온도 제어로 인해 많은 시간이 소요된다. 따라서 능동형 SAR 안테나의 송수신 모듈 보정을 위해 필요한 데이터의 효율적인 확보를 위해 측정 시간 단축이 요구되며, 온도 별 송수신 모듈의 상태 변화를 분석하기 위해 2조의 송수신 모듈을 시범 측정(pilot test)을 수행하였다. 송수신 모듈에는 온도 정보를 BCU에 전달하기 위해 디지털 감쇠기와 위상 변위기 위치에 온도 센서가 부착되어 있으며, 온도 챔버 내에 송수신 모듈을 위치시키고 열교환기를 이용하여 온도를 제어하였다. 시범 측정은 송신과 수신 경로와 수평 및 수직 편파에 대해서 측정을 수행하였으며, 측정 시 온도 환경은 다음과 같다.

송신 경로

- 모듈 온도 15 °C : 온도챔버 3 °C, 열교환기 11 °C
- 모듈 온도 30 °C : 온도챔버 25 °C, 열교환기 22 °C
- 모듈 온도 45 °C : 온도챔버 45 °C, 열교환기 36 °C

수신 경로

- 모듈 온도 15 °C : 온도챔버 13 °C, 열교환기 13 °C
- 모듈 온도 30 °C : 온도챔버 29 °C, 열교환기 28 °C
- 모듈 온도 45 °C : 온도챔버 45 °C, 열교환기 42 °C

그림 11과 12는 상기 온도 환경에서의 시범 측정에 대한 2조의 송수신 모듈의 주파수 별 이득과 위

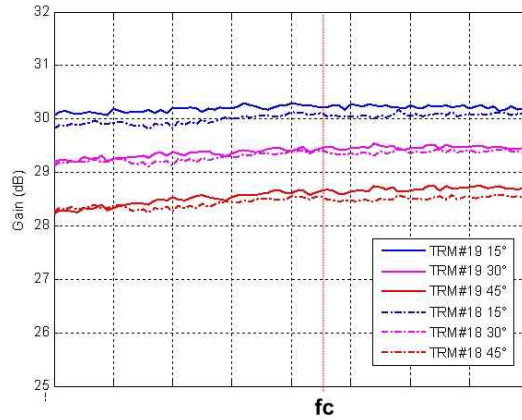


그림 11. 송수신 모듈 시범 측정 결과(이득)
Fig. 11. Pilot test results for T/R module(amplitude).

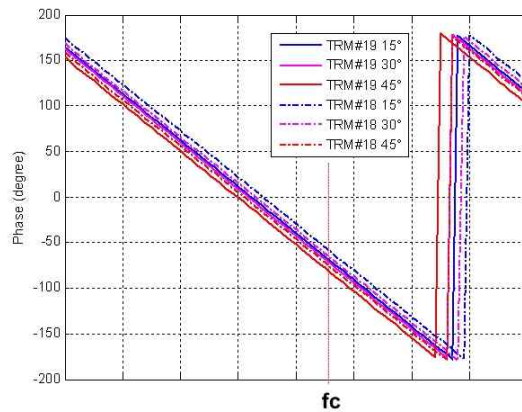


그림 12. 송수신 모듈 시범 측정 결과(위상)
Fig. 12. Pilot test results for T/R module(phase).

상 측정 결과이다. 이득은 0 dB로 설정하고 위상은 0°로 설정한 후 절대치를 비교하였다(이득은 0 dB로 설정하고, 위상을 0°로 설정한 것을 기준 설정값이라 정의하였다.).

그림 13과 14는 시범 측정의 2조의 송수신 모듈에 대한 온도 별 이득과 위상 상태 변화에 대한 상대적인 출력 측정 결과이다. 2조의 시범 측정 송수신 모듈의 온도에 대한 상대적인 상태 변화는 동일함을 확인하였다.

온도 별로 송수신 모듈의 상태 변화에 대한 출력 데이터 확보에 많은 시간이 소요될 뿐만 아니라 특정 온도에 대해서 16조의 송수신 모듈의 64×64 상태 map을 생성하는 작업도 많은 시간과 노력이 필요하다.

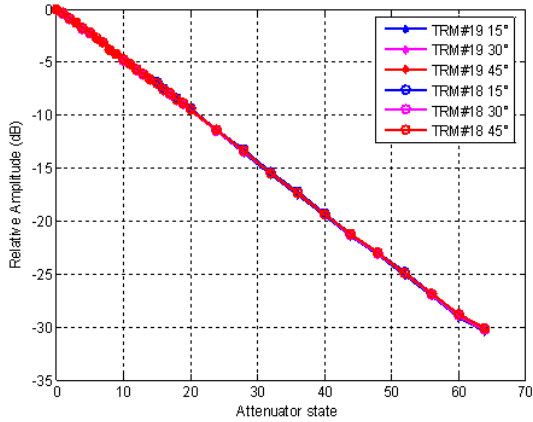


그림 13. 온도 변화에 대한 상대적인 출력 결과(이득)
 Fig. 13. Relative output for temperature variation(amplitude).

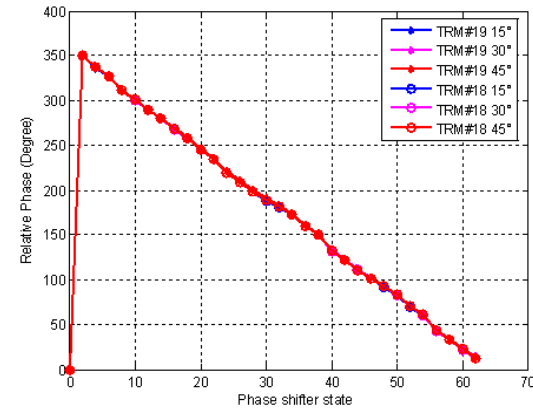


그림 14. 온도 변화에 대한 상대적인 출력 결과(위상)
 Fig. 14. Relative output for temperature variation(phase).

그림 15의 빨간 원은 이득을 0 dB로 고정하고, 위상을 변화(64×1 map)시켜 측정하고, 위상을 0°로 고정하고 위상을 변화(1×64 map)시켜 측정한 후 상호 조합을 통해 획득한 이득/위상 상태에 대한 64×64 map이며, 파란 점은 같은 송수신 모듈에 대해서 모든 64×64 상태 변화에 대해서 측정한 결과이다. 그림에서 확인할 수 있듯이 1×64와 64×1 상태에 대한 결과를 상호 조합하면 유용한 결과를 도출할 수 있으며, 그만큼 측정에 투자해야 하는 시간을 절약할 수 있다.

위 2조의 시범 측정 결과(그림 11~그림 14)와 64×64 이득/위상 상태 변화 비교 map(그림 15)로부

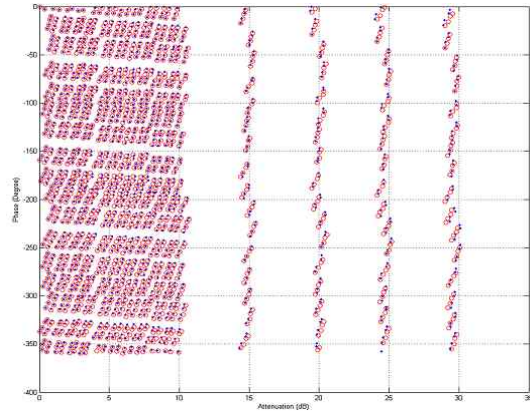


그림 15. 수신 경로 64×64 이득/위상 데이터 비교
 Fig. 15. Comparison of 64×64 gain/phase map for receive mode.

터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

- 특정 주파수에서 온도 변화에 의한 이득과 위상의 변화는 있으나 예측 불가능한 극심한 변화는 없다.
- 온도 변화에 의해 각 송수신 모듈의 이득과 위상 상태 변화에 대한 상대적인 간격은 유지한다.
- 송수신 모듈의 이득을 고정하고 위상의 상태를 변화시켜 얻은 1×64 데이터와 위상을 고정하고, 이득의 상태를 변화시켜 얻은 64×1 데이터를 조합한 64×64 데이터는 전체 측정 결과와 유사하다.

다음 절에서는 위에서 획득한 송수신 모듈의 오차에 대한 분류와 오차의 특성 분석 결과를 근거로 하여 송수신 모듈 오차 보정 방법 및 제어 방법에 대해서 서술한다.

2-4 보정 방법 및 제어 방법

그림 16은 송수신 모듈 온도 변화 오차 보정 방법에 대한 개념을 2조의 송수신 모듈로써 예시를 보인 것이다. 빨간색 곡선은 4개의 온도(주황색 점선)에서 "a" 송수신 모듈을 기준 설정값로 제어하였을 때 측정된 이득 또는 위상 값을 보간법을 이용하여 획득한 변화 곡선이고, 파란색 곡선은 "b" 송수신 모듈의 변화 곡선이다. 기준 온도에서 이득 또는 위상이 수렴하도록 하는 역 곡선은 각각 빨간색 점선과 파란

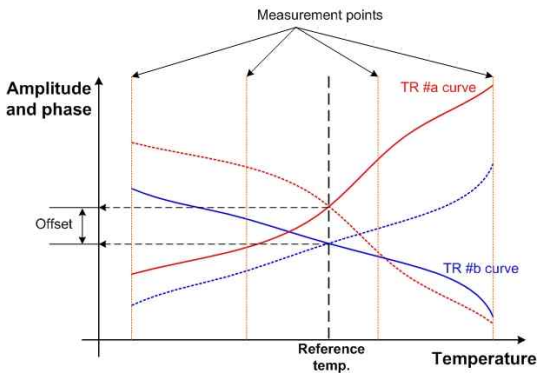


그림 16. 온도에 의한 오차 보정 개념도
 Fig. 16. A schematic diagram for the error compensation with changing temperature.

색 점선이다. 두 송수신 모듈의 이득 또는 위상의 수렴 값의 차이가 오프셋 오차가 되며, 그 값으로 정규화하고 남은 역 곡선의 경향을 온도 보정 LUT 형태로 생성하는 것이다. 개발된 능동형 SAR 시스템의 제어부 역할을 대신하는 제어 컴퓨터에 송수신 모듈의 오프셋 오차와 설정 오차를 보정할 수 있는 수정 빔 파라미터를 저장하고, 안테나 내부 BCU에는 온도 보상 LUT을 저장한다. BCU에 온도 보정 LUT를 저장하는 이유는 BCU가 안테나 내부의 각 구성품으로부터 온도 정보를 수집하기 때문에 각 송수신 모듈의 온도 변화에 대해 LUT의 신속한 갱신이 가능하기 때문이다. 위 개념 및 오차의 특성을 바탕으로 송수신 모듈의 보정을 위해 필요한 데이터 확보 및 본 논문에서 제안한 보정 방법에 대한 과정은 다음과 같다.

1. 개별 송수신 모듈의 이득과 위상의 상태 변화에 대한 64×1과 1×64 출력 신호 측정
2. 1번 항목 측정 결과를 이용하여 개별 송수신 모듈의 64×64 데이터 완성: 이득과 위상 각각 64×64 데이터가 생성됨. 따라서 송신과 수신, 수평과 수직 편파에 대해서 총 8 set의 데이터가 있으며, 이러한 데이터가 개별 송수신 모듈에 대해서 각각 있으므로 총 128개의 64×64 데이터 set이 생성
3. 획득한 64×64 데이터를 기준 설정값(이득: 0 dB, 위상: 0°)에 대한 출력 값으로 정규화
4. 정규화된 64×64 데이터에서 원하는 값이 출력

되는 제어 값과 이론적인 제어 값을 대응시키는 표를 완성

5. 송수신 모듈을 기준 설정값(이득: 0 dB, 위상: 0°)으로 고정하고 온도를 제어해 3~4개의 온도 지점에 대한 출력을 측정
6. 각 송수신 모듈에 대해서 측정한 데이터를 바탕으로 온도에 대한 출력 변화 곡선을 보간법을 이용하여 획득
7. 5번 항목에서 획득한 곡선이 특정 온도에서 일정한 값을 가지도록 역 곡선을 도출
8. 역 곡선에 의해 각 송수신 모듈이 수렴하는 값들을 표로 구성: 이득의 오프셋 오차 보정은 가장 작은 값을 가지는 송수신 모듈의 출력만큼 다른 송수신 모듈의 이득을 조정하고, 위상은 상대적인 값이므로 최대한 오차 보정 범위를 작게 가져가기 위해서 그림 3의 1번 T/R 모듈의 위상과 일치하도록 조정
9. 수렴 값으로 각 송수신 모듈의 역 곡선을 정규화한 후 온도 변화에 대한 이득과 위상의 상태 변화를 이용해 온도 보정 LUT(Look Up Table)을 완성
10. 3번 항목 표와 8번 항목 표를 종합하여 수정 빔 파라미터(corrective beam parameters)를 생성

위 보정 과정에서 4번 항목의 표는 송수신 모듈 설정 오차를 보정하기 위한 것이며, 8번 항목은 송수신 모듈 오프셋 오차를 보정하기 위한 것이다. 그리고 9번 항목의 온도 보정 LUT은 송수신 모듈의 온도 변화 오차를 보정한다.

그림 17은 위 보정 방법을 적용한 송수신 모듈 제어 개념을 나타낸다. 제어 컴퓨터에서 원하는 안테

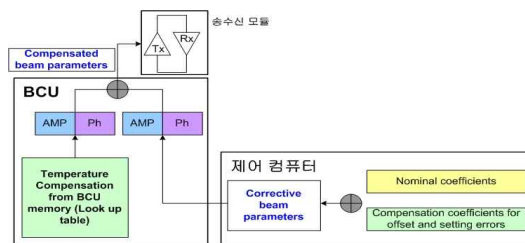


그림 17. 송수신 모듈 제어 개념도
 Fig. 17. Schematic diagram of T/R module control.

나 빔 패턴 형성을 위해 송수신 모듈의 이론적인 설정값(nominal beam coefficients)에 대해 송수신 모듈의 오프셋 오차와 설정오차를 보정하기 위한 보정 빔 설정값(compensation coefficients for offset and setting errors)을 합친 수정 빔 설정값(corrective beam parameters)를 BCU에 전송한다.

BCU에서는 송수신 모듈로부터 받은 온도 정보에 대응하는 온도 보정 데이터와 제어 컴퓨터로부터 받은 수정 빔 파라미터를 종합하여 보정 빔 파라미터(compensated beam parameters)를 생성해 EFE로 전송해 각 송수신 모듈의 이득과 위상을 제어한다.

2-5 보정 결과 비교

표 1은 송수신 모듈이 EFE에 조립된 상태에서 각 송수신 모듈의 온도 분포가 28~30 °C인 경우 중심 주파수에서 기준 설정 값에 대한 보정 전 송수신 모듈의 출력이다. 수신 경로이며 편파는 수평 편파이다. 각 송수신 모듈의 이득 출력 분포는 28.2~29.0 dBm이며, peak to peak 약 0.8 dB의 차이를 가진다. 위상 분포는 101.7~165.2°이며, peak to peak 약 63.5°의 차이를 가진다.

표 1. 보정 전 송수신 모듈 출력

Table 1. T/R module output before compensation.

T/R #	이득(dBm)	위상(°)
1	28.2	116.1
2	28.7	115.4
3	28.5	101.7
4	28.4	115.3
5	28.6	118.1
6	28.2	132.5
7	28.6	123.8
8	28.5	112.7
9	28.5	147.0
10	28.4	165.2
11	28.9	150.3
12	28.4	130.8
13	29.0	151.2
14	28.3	144.9
15	28.5	140.6
16	28.4	152.7

표 2. 보정 후 송수신 모듈 출력

Table 2. T/R module output after compensation.

T/R #	이득(dBm)	위상(°)
1	27.8	116.5
2	27.8	116.0
3	27.7	119.6
4	27.4	116.1
5	27.6	119.0
6	27.8	118.9
7	28.0	118.9
8	27.5	121.5
9	27.8	113.5
10	26.9	119.9
11	27.6	117.6
12	27.6	117.3
13	27.6	118.0
14	27.7	118.1
15	27.7	116.9
16	28.0	120.0

표 2는 본 논문에서 제안한 보정 방법과 송수신 모듈 제어 방법을 이용하여 보정 후 송수신 모듈의 출력 포트에서 중심 주파수에 대해 획득한 이득과 위상 결과이다.

보정 후 16조의 송수신 모듈의 출력에서 보정 전과 비교하여 매우 고른 이득/위상 분포를 획득했다. 16조의 송수신 모듈 간 출력에서 이득 분포는 약 27.4~28.0 dBm로 4번 송수신 모듈과 16번 송수신 모듈 사이에서 가장 큰 차이를 보였으며, 위상 분포는 약 116.1°~120.0°로 역시 4번 송수신 모듈과 16번 송수신 모듈 사이에서 가장 큰 차이를 보였다. 송수신 모듈 10번의 경우 이득이 다른 송수신 모듈 분포와 차이가 있으나, 이를 보정할 경우 반대로 위상 불균형이 발생하는 것을 확인하였다. SAR 시스템 특성 상 이득 불균형보다 위상 불균형이 성능에 악영향을 미치므로 위상 분포의 균형적인 획득에 가중치를 두었다.

그림 18은 보정 전과 후의 송수신 모듈 출력 값을 배열 이론을 이용하여 안테나 빔 패턴을 생성한 후 고각 방향(vertical cut) 빔 패턴을 비교한 그림이며, 표 3은 그림 18을 바탕으로 보정 전과 후 주요 안테

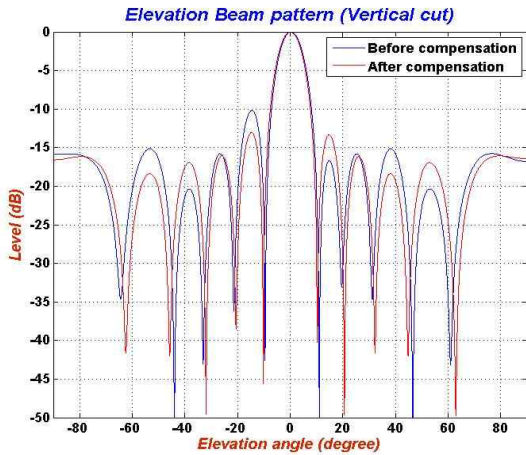


그림 18. 보정 전과 후 고각 방향 안테나 빔 패턴
Fig. 18. Elevation beam pattern for before and after compensation.

표 3. 보정 전 후 안테나 성능 변수
Table 3. Antenna performance parameters for before and after compensation.

변수	보정 전	보정 후
SLL(dB)	-10.2	-13
빔 중심(°)	0.3	0

나 성능 변수를 비교한 것이다.

그림 18에서 확인할 수 있듯이 보정 전 부엽이 주엽을 기준으로 비대칭으로 나타났다. 부엽이 비대칭이라는 것은 주엽의 빔 중심과 관련이 있다. 빔 중심이 어긋나는 현상은 SAR 시스템의 주요 성능 변수인 빔 포인팅 오차의 직접적인 요소이며, 정확한 표적 및 영상 획득을 위해서는 안정적인 주엽의 빔 중심 지향이 필요하다. 또한 보정 전의 높은 최대 부엽 레벨(peak Side lobe level)은 SAR 시스템 성능 변수인 모호성 비 증가의 원인이 된다. 반면, 보정 후 빔 중심은 0°를 지향하며, 대칭적이고 낮은 부엽을 확인할 수 있었다.

III. 결 론

본 논문에서는 능동형 SAR 시스템의 성능 만족을 위해 송수신 모듈에서 발생하는 다양한 오차에

대해서 정의하였다. 또한, 시범 측정을 통해 획득한 데이터를 바탕으로 각 오차의 특성을 분석하여 효율적이고 통합적인 보정 방법 및 제업 방법을 제안하였다. 기 개발된 안테나에서 16조의 송수신 모듈에 대한 보정 전과 후의 출력 이득과 위상을 측정하여 비교하였으며, 배열 이론을 적용하여 안테나 빔 패턴 및 안테나 성능 변수를 비교하였다. 송수신 모듈의 출력 및 안테나 성능 변수에서 보정 전에 비해 보정 후 양호한 결과를 획득하여 능동형 SAR 시스템의 성능 만족을 위해 본 논문에서 제안한 송수신 모듈 보정 방법이 매우 효과적임을 확인하였다.

참 고 문 헌

- [1] C. A. Wiley, "Synthetic aperture radars", *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 21, no. 3, pp. 440-443, May 1985.
- [2] Warren L. Stutzman, Gary A. Thiele, *Antenna Theory and Design*, New York: Wiley, 1998.
- [3] J. C. Curlander, R. N. McDonough, *Synthetic Aperture Radar Systems and Signal Processing*, New York: Wiley, 1991.
- [4] M. Stangl, R. Werninghaus, and R. Zahn, "The TerraSAR-X active phased array antenna", *Pro. IEEE Phased Array Symp.*, Boston, pp. 70-75, Oct. 2003.
- [5] M. Adolph, U. Hackenberg, R. Reber, R. Rieger, B. Schweizer, B. Adelseck, H. Brugger, and M. Lorcher, "High-precision temperature drift compensated T/R-module for satellite based SAR applications", *IEEE Microwave Conference*, European, vol. 2, 2005.
- [6] 이동우, 김세영, 이종환, 전병태, "능동형 영상레이다를 위한 이중편파 광대역 마이크로스트립 패치 배열 안테나", *대한전자공학회 하계종합학술대회*, 32(1), pp. 64-65, 2009년 7월.
- [7] 정민길, 김상근, 나형기, 이종환, 이동우, 백승훈, "능동 위상 배열 SAR 안테나를 위한 X-대역 송수신 모듈의 설계 및 제작", *한국전자과학회논문지*, 20(10), pp. 1050-1060, 2009년 10월.

이 동 우



2002년 8월 : 충남대학교 전파공학과 (공학사)
2005년 2월: 포항공과대학교 전자공학과 (공학석사)
2005년 3월~현재: 국방과학연구소 선임연구원

[주 관심분야] 영상레이더 안테나 및 시스템

김 세 영



1991년 2월: 단국대학교 전자전기공학부 (공학사)
1993년 2월: 단국대학교 전자전기공학과 (공학석사)
1993년 3월~현재: 국방과학연구소 선임연구원

2010년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학박사)
[주 관심분야] 레이더 및 영상레이더 초고주파 시스템 등

이 중 환



1998년 2월: 충남대학교 전파공학과 (공학사)
2000년 2월: 충남대학교 전파공학과 (공학석사)
2005년 1월~2006년 10월: (주)삼성탈레스 책임연구원
2006년 2월: 충남대학교 전파공학과 (공학박사)

2006년 10월~현재: 국방과학연구소 선임연구원
[주 관심분야] 초고주파 회로 및 시스템

전 병 태



1986년 2월: 경북대학교 전자공학과 (공학사)
1988년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학석사)
1993년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학박사)
1993년 3월~현재: 국방과학연구소 책임연구원

[주 관심분야] 영상레이더 및 초고주파 시스템